기술기사 | 한국지반공학회지 | Vol.22, No.3 | pp.21~29

Fast Track방식에 의한 건축구조물의 현장타설말뚝 공사 사례

고 형 선[*1], 한 용 희[*2], 조 천 환[*3]

1. 서 언

최근의 건축공사에서 공기단축과 경제성 개선을 위해 구조물의 설계와 시공이 동시에 이루어지는 Fast Track 방식으로 추진되는 경우가 많아 지고 있다. 특히, 공사기간이 충분하지 못해서 지하층과 지상층 공사를 동시에 수행할 수 있는 Top-Down공법이 적용되는 사례도 있다.

일반적으로 Top-Down공사를 계획하는 건축물은 각 기둥에 작용하는 하중이 매우 커서 대구경 현장타설말뚝이 많이 사용되고 있다. 그러나, 현장타설말뚝의 설계가 불확실성이 많은 지반조건을 불충분한 시추조사 결과에 근거하고 있는 경우가 많아서 구조물 전체의 안정성을 담보하여야 할 기초의 설계와 시공관리가 상대적으로 소홀히 취급되고 있는 실정이다.

*1 삼성물산 건설부문 건축기술팀 토목파트 과장
*2 삼성물산 건설부문 건축기술팀 토목파트 파트장
*3 삼성물산 건설부문 T.A Team 전문위원
(chunwhan.cho@samsung.com)

본 고에서는 Fast Track 방식으로 추진된 건축공사 현장에서 현장타설말뚝 시공시 수행한 품질 관리 절차 사례를 고찰하였다. 이 절차에는 기본 설계의

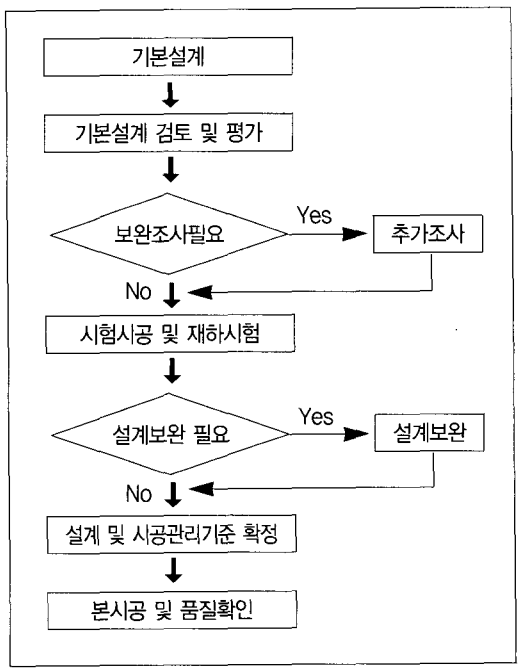

그림 1. 현장타설말뚝 시공관리절차도

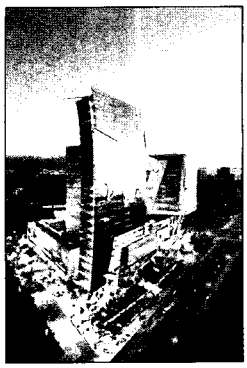

그림 2. 전면조감도

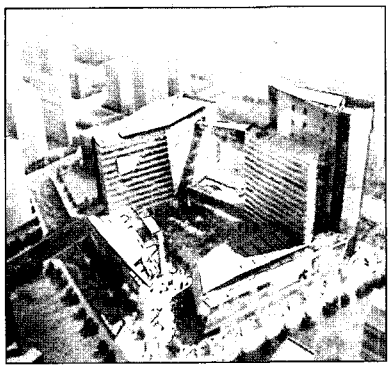

그림 3. 후면조감도

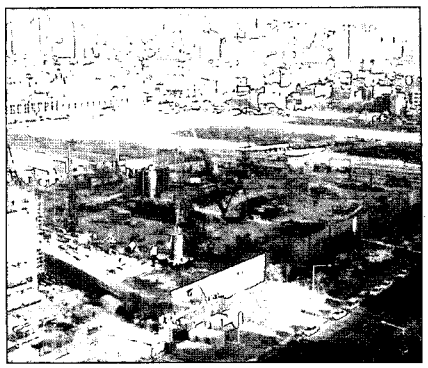

사진 1. 현장전경

평가 및 추가지반조사, 시험시공 및 재하시험, 실시설계 및 시공관리기준의 확정, 본시공시 품질확인 사항에 대한 내용이 포함된다. 그림 1은 사례 현장에서 적용한 시공관리절차를 나타낸 것이다.

2 현장개요

2.1 공사개요

본 현장은 서울시가 2010년 완공을 목표로 추진중인 상암동 첨단 IT 집적단지에 계획한 연면적 약 4만5천여평, 지상22층(최고) 지하4층의 대형 건축물로서 업무, 교육, 전시, 근린생활시설이 망라된 복합시설물이다. 지하 굴착공사는 Top-Down공법이, 기초공법은 현장타설말뚝이 채택되었는데, 현장타설말뚝은 PRD(Percussion Rotary Drill)공법과 RCD(Reverse Circulation Drill)공법을 적용하였다. 그림 2, 3은건축물의 전면과 후면 조감도를, 사진 1은 현장타설말뚝 공사가 진행중인 현장 전경사진을 나타내었다.

2.2 지반조건

기본설계를 위해 총 15공(NX)의 시추조사를 수행하였다. 그림 4는 기본설계시 수행한 지반조사 위치

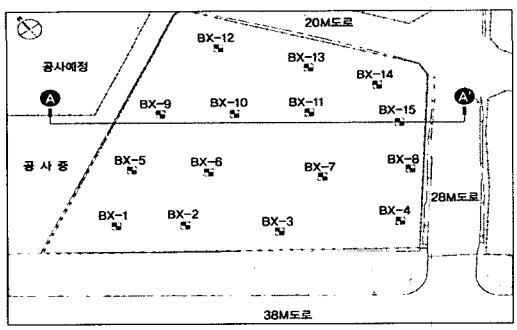

그림 4. 지반조사 위치도

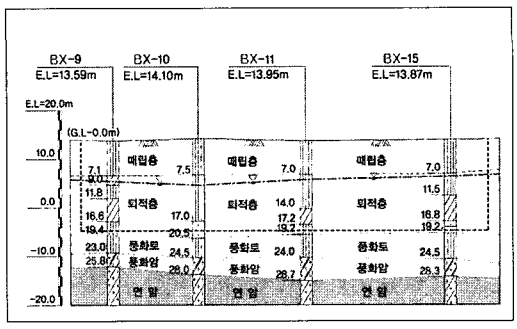

그림 5. 지층단면도(단면A-A')

표 1. 현장타설말뚝의 구경별 최대 설계하중

구경	최대 설계하중(tonf)	시공방법	설계지지력
D800mm	834	PRD공법	- 설계 주면 마찰지지력 풍화암 : 13.1 tonf/m², 연암 : 41.2 tonf/m² - 설계 선단지지력 연암 : 640 tonf/m²
D1,500mm	1,532	RCD공법	
D2,000mm	2,384		
D2,500mm	4,339		

도이며, 그림 5는 대표 지층단면도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지층 분포는 매립층, 퇴적층, 풍화토, 기반암 순으로 이루어 졌으며 기반암종은 편마암이다. 시추조사시 확인된 연암층의 암질상태는 TCR=64~100%, RQD=0~48%정도로 나타났다.

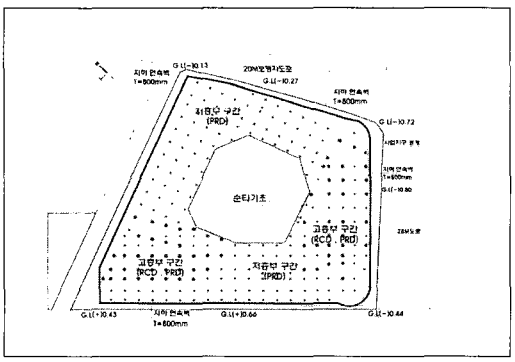

그림 6. 현장타설말뚝 평면도

2.3 기초설계

건축구조 설계결과, 기초에 작용하는 최대 하중은 고층부 4,339tonf, 저층부 834tonf으로 나타났으며, 하중편차가 큰 설계조건에 대응하기 위해 말뚝의 제원을 D800mm, 1,500mm, 2,000mm, 2,500mm의 네 종류로 계획하였다. 현장타설말뚝의 시공방법은 시공효율성을 고려하여 D800mm에 대해서만 PRD공법을 적용하고, 나머지는 RCD공법을 채택하였다.

PRD공법은 Pile Driver에 장착된 해머비트를 압축공기에 의하여 타격하면서 회전하여 굴착하는 공법으로 현장타설말뚝에서는 D800mm정도에서 효율이 높은 공법이다. RCD공법은 로타리 테이블 선단에 부착된 특수 비트를 회전시키면서 지반을 굴착하고 흡상펌프로 슬라임을 빨아들여 배출하는 공법으로, 본 현장에서는 공벽유지방법으로 케이싱을 사

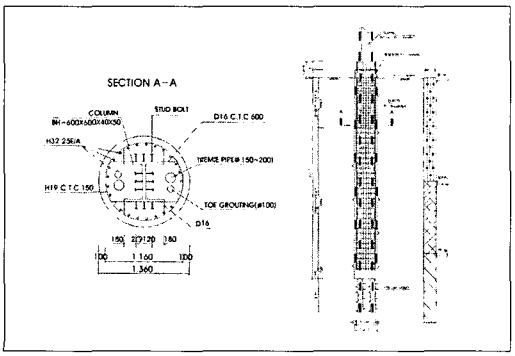

그림 7. RCD말뚝 단면도

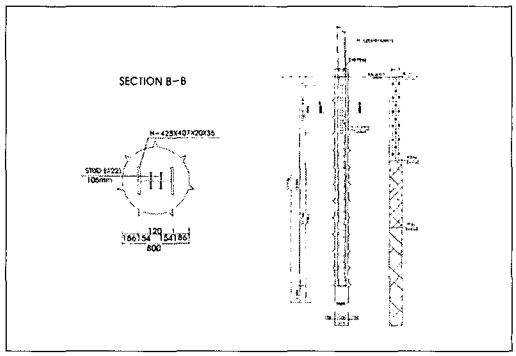

그림 8. PRD말뚝 단면도

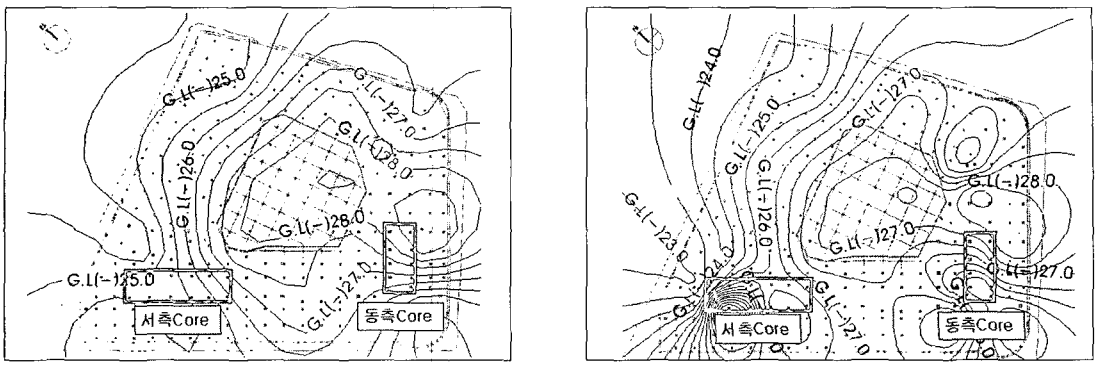

그림 9. 연암 분포도 비교

용하였다.

현장타설말뚝의 최대 하중은 표 1에 나타낸 바와 같으며, 일반적인 말뚝직경별 설계하중과 비교하면 다소 큰 값이다. 그림 6~그림 8은 각각 말뚝시공계획 평면도와 D800mm와 D1,500mm 말뚝의 Typical 구조 단면을 나타낸 것이다.

3. 기본설계검토

본 현장의 현장타설말뚝 설계는 풍화암의 주면마찰력과 연암층의 주면마찰력과 선단지지력을 고려하였다. 그러나, 풍화암 층후를 평가하여 설계지지력의 확보여부를 판단하기에는 시추조사 수량이 충분하지 못한 것으로 판단하여 추가 시추조사를 실시하였다. 또한, 4,000tonf을 초과하는 대규모 하중이 작용하는 말뚝에 대하여는 고강도 콘크리트(f_{ck}= 450kgf/cm^2)의 사용이 필요한 것으로 판단하였다.

3.1 추가지반조사

현장타설말뚝 시공시 풍화암 층후에 대한 신뢰도 높은 판단을 위해 고층부 Core구간을 중심으로 총 12공(NX규격)을 추가 시추조사 하였다. 추가 시추공중 2공은 말뚝 재하시험 조건을 파악하기 위하여 시험시공위치에 시행하였다. 그림 9는 기본설계의 시추조사결과를 토대로 작성한 기반암(연암) 분포상태와 추가 지반조사결과로 분석한 결과를 비교한 것이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 동측 Core 부분은 기본설계조건과 비교할 때 연암 출현심도 변화가 약 1m 범위내로서 상대적으로 큰 차이는 없는 것으로

표 2. 수중불분리 콘크리트 시방배합 기준

구분	W/Baa(%)	S/a(%)	단위재료량(kgf/m^3)			
			W	C	증점제	AD
수중불분리 (20-45-55)	33.0	38.5	220	667	2.1 (W×0.95%)	16.7 (W×2.5%)

※ AD : 폴리카본계(고형분 20%)

나타났다. 그러나, 서측Core 구간에서는 연암 출현 심도가 최대 4~7m 정도의 큰 차이를 보일 정도로 연암선 분포상태가 기본설계시 예상한 것과 크게 달랐는데, 암반선 판단 오류로 발생할 수 있는 문제들을 사전에 방지할 수 있었다.

3.2 고강도 콘크리트의 적용

기본 설계시 현장타설말뚝의 본체는 f_{ck}=350kgf/cm^{2}의 콘크리트를 사용하도록 설계되어 있었다. 그러나, 실시설계로 확정된 건축구조 해석결과, 고층 Core부의 일부 말뚝에서는 기본설계시 고려한 부재력보다 큰 압축강도가 필요한 것으로 나타나 f_{ck}=450kgf/cm^{2}의 고강도 콘크리트를 사용하는 것으로 설계변경 하였다.

그러나, 수중타설 조건에서 고강도 콘크리트를 타설할 경우, 소요 설계강도를 확보하기 위한 품질관리가 어렵고 강도부족시 대책마련이 곤란하다는 문제가 있다. 따라서, 재료분리 저항성이 우수하고 충분한 본체강도 확보를 위해 수중 불분리 콘크리트를 적용하였다. 표 2에는 본 현장에 적용한 수중 불분리 콘크리트 시방배합을 나타내었다.

3.3 설계지지력의 확인

기본설계시 현장타설말뚝의 지지력 평가는 암반의 일축압축강도에 근거한 것이다(표 1 참조). 이 결과에 기초하여 추가지반조사로 확인된 암반분포상태, 즉, 풍화암 층후와 연암 층후조건을 말뚝별로 정리하여 설계지지력의 만족 여부를 재확인하여 말뚝 시공계획을 수립하였다. 이러한 설계변경 절차에서 건축구조계획 담당자와 현장타설말뚝의 설계, 시공 관리자의 커뮤니케이션이 매우 중요한데, Fast Track 공사에서는 공정상 하중계획의 확정에 앞서 말뚝 시공이 이루어지기 때문에 말뚝이 시공된 후 지지력이나 부재력이 부족해지는 문제가 발생하지 않아야 하기 때문이다.

4. 시험시공 및 재하시험

4.1 시험시공

시험시공은 시추조사만으로는 확인하기 어려운 지반특성, 지지력의 확인, 시공성 확인을 위하여 본 시공전에 실시하는 중요 공정이다. 특히 Fast Track 공사에서는 실제 시공조건에 대한 예측이 틀릴 경우, 공기 지연의 직접적 원인이 될 수 도 있기 때문에 시험시공은 필수적이며, 시험시공 후에는 재하시험을 실시하여 설계시 고려한 지반 지지력의 적정성을 판단함으로써 최적의 공사계획 수립이 가능하다. 본 사례 현장에서는 제반 설계조건에 대한 검토결과를 토대로 실시공 조건과 동일한 조건으로 시험시공을 실시하여 본시공시 발생할 수 있는 잠재적인 문제점들을 도출하고 대비하였다.

4.2 재하시험

재하시험 위치는 대규모 하중이 집중된 고층부 Core구간 RCD말뚝과 저층부의 PRD말뚝중 대표성을 갖는 지반조건을 갖는 위치를 찾아서 결정하였다. 재하시험 방법은 기존 재하시험 방법에 비해 경제성, 큰 재하능력, 간소한 재하장비, 그리고 지지력의 분리 측정 등에서 장점이 있는 O-Cell(Osterberg

표 3. 설계지지력 조건과 시험하중

구 분	단위면적당 설계 허용지지력(tonf/m²)			시험말뚝의 계산 허용하중(tonf)	최대시험하중 (tonf)
	주면마찰력		선단지지력		
	풍화암	연암			
PRD(D800)	13.1	41.2	640	641.3	2,100
RCD(D1,500)	13.1	41.2	640	1,514.1	4,800

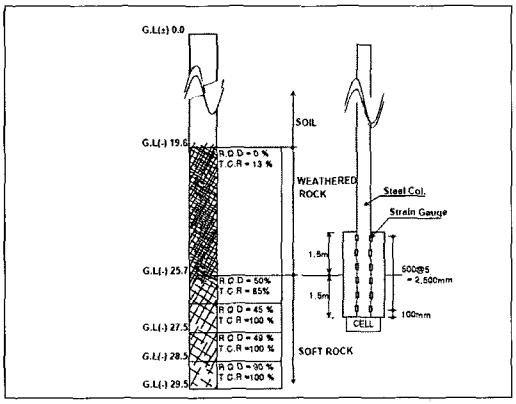

그림 10. PRD 재하시험 계획단면

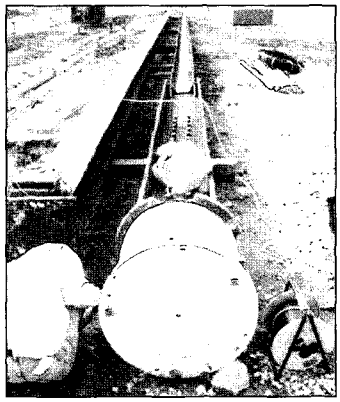

사진 2. 조립이 완료된 시험말뚝(PRD)

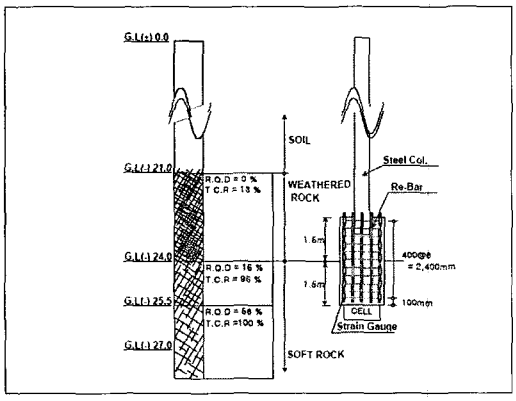

그림 11. RCD 재하시험 계획단면

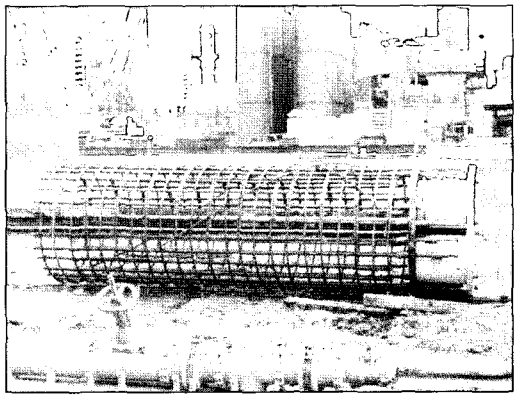

사진 3. 조립이 완료된 시험말뚝(RCD)

Cell)시험법을 채택하였다. 시험하중은 설계조건, 현장여건, 지반조건, 말뚝의 크기 등을 고려하여 표 3과 같이 결정하였다. 표 3에서 최대 시험하중은 시험말뚝의 극한하중을 고려하여 시험말뚝 계산 허용하중의 3배 이상이 되도록 하였다.

재하시험시 풍화암과 연암층에서 나타나는 하중전이현상을 파악하기 위하여 시험말뚝 본체내에 진동현식 변형률계를 400mm~500mm 간격으로 배

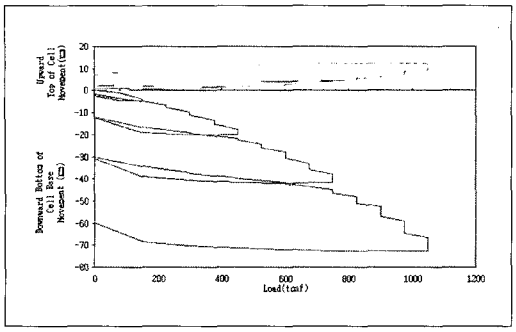

그림 12. PRD말뚝의 시험하중-변위곡선

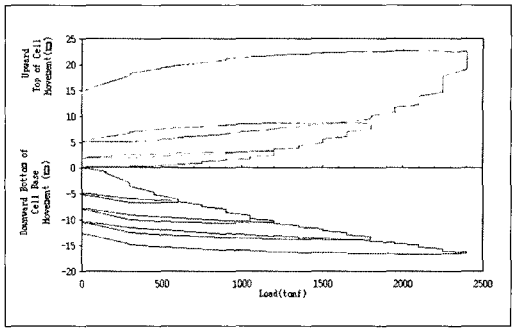

그림 13. RCD말뚝의 시험하중-변위곡선

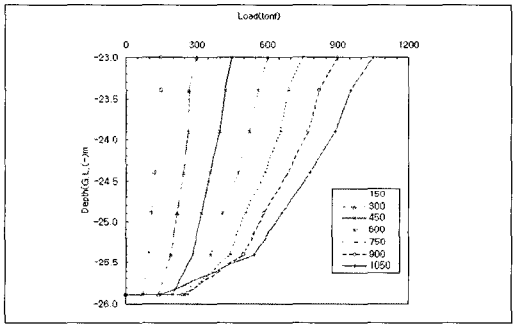

그림 14. 두부재하조건의 하중전이(PRD

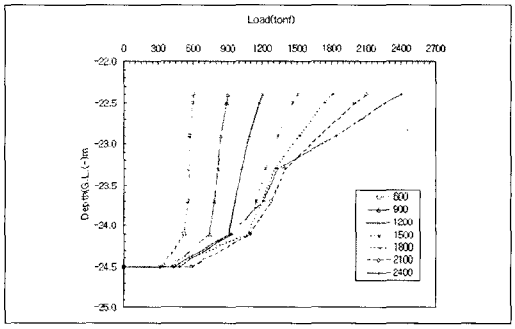

그림 15. 두부재하조건의 하중전이(RCD)

표 4. 재하시험 결과 요약 (단위:tonf/m²)

구분	풍화암층 허용 주면마찰력			연암층 허용주면마찰력			허용 선단지지력		
	설계조건	시험결과	설계적정성 평가결과	설계조건	시험결과	설계적정성 평가결과	설계조건	시험결과	설계적정성 평가결과
PRD	13.1	16.8	O.K	41.2	60.8	O.K	640.0	783.6	O.K
RCD	13.1	20.2	O.K	41.2	73.8	O.K	640.0	962.4	O.K

치하였다. 또한, O-Cell 상부와 하단부에서의 변위 측정을 위해 변위계 등을 설치하였다. 그림 10과 그림 11은 각각 시험시공위치에 시행한 지반조사 결과와 재하시험 계획단면을 나타낸 것이며, 사진 2와 사진 3은 계측기 부착이 완료된 시험말뚝을 보인 것이다.

그림 12와 그림 13은 각각 PRD말뚝과 RCD말뚝의 O-Cell 시험결과를 나타낸 것이다. 말뚝은 지지력 뿐 아니라 침하도 구조물의 안정에 직접적인 영향을 미치므로 말뚝 두부에서의 하중-변위 관계를 아는 것이 중요하다. 그러나, O-Cell시험은 두부재하방식 시험과는 달리 말뚝 선단부에서 재하하는 방식이므로 말뚝두부의 하중-변위 곡선을 직접 구할 수 없다. 따라서, 말뚝이 비압축성이라는 가정 하에 두부하중-변위 곡선을 산출하는데(Osterberg, 1998), 본 시험에서도 같은 방법으로 분석하였다.

그림 14와 그림 15는 각각 PRD말뚝과 RCD말뚝

의 두부재하조건의 하중전이 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 먼저 재하중에 대한 하중전이상태를 말뚝에 설치된 계측기로 변형률을 측정한 후 계측기 설치위치를 기준으로 선단부에서부터 구간별로 계산된 주면마찰력을 상향으로 누적시키는 환산과정을 거쳐 정리한 것이다.

표 4는 풍화암층과 연암층의 설계조건과 재하시험결과를 비교 평가한 결과이다.

5. 시공관리 및 품질확인

5.1 암판정

본 사례현장은 연암층 뿐 아니라 풍화암층도 말뚝기초의 지지층으로 고려하였으므로, 풍화암의 층후에 대한 판단이 중요하였다. 따라서, 실시설계가 완료되기 전에 추가 지반조사와 시험시공을 실시하고 이를 토대로 말뚝별로 굴착예정깊이를 정한 후 본시공을 실시하였고, 본 시공시 풍화암의 분포상태를 말뚝별로 확인하였는데, 사전에 예측한 풍화암 출현심도 상부 2m부터 1m간격으로 말뚝선단부까지 시편을 채취하여 풍화암의 층후, 연암의 상태 등을 판단하였다. 아울러, 암반층 확인은 감리자와 및 시공자가 공동으로 실시하여 객관적이고 신뢰성 높은 암판정을 실시하였다.

5.2 수직도 관리

수직도는 굴착공과 철골기둥에 대해서 관리하였다. 천공 중에는 천공기 리더를 두 대의 측량기로 90° 교차 측정하는 방식으로 수행하였고, 천공후에는 KODEN검측기를 이용하여 수직도를 확인하였다. 철골기둥의 수직도는 철골기둥에 표지판을 부착한 후 시공단계별로 레이져 검측기를 이용하여 관리하였다.

5.3 슬라임 처리

본 현장에서 사용한 1차 서징방법은 PRD 말뚝에서는 Jet Suction방식을, RCD말뚝에서는 천공기의 공회전 방식을 실시하였다. 슬라임 처리의 관리는 서징 배출수의 침전량을 측정하는 방식을 적용하였다. 슬라임의 침전율(사분율)은 1%를 목표로 하되, 시험시공을 통해 목표 사분율 도달에 필요한 서징시간을 측정하여 시공관리기준을 설정하였다. 또한, 천공-철골건입-콘크리트 타설을 연속적으로 하도록 하되, 연속시공이 어려운 경우에는 콘크리트 타설 직전에 공저 상태를 재확인하여 슬라임 침전상태에 따라 2차 서징을 실시하거나 경미한 경우에는 에어리프팅(air lifting)을 실시토록 하였다. 본 시공시 적용할 슬라임 처리방법들에 대하여는 시험시공 과정에서 사용성과 효과를 모두 확인하였다.

5.4 콘크리트

수중콘크리트의 품질관리를 위하여 수중 불분리 콘크리트를 사용하였다. 수중 불분리 콘크리트는 배합설계에 상당한 시일이 소요되므로, 공정계획시 이 기간에 대한 고려가 필요하였다. 또한, 시험시공시에 주문-운반-타설 등 일련의 콘크리트 작업과정을 실시공조건과 동일하게 수행하여 시공 과정에서 발생할 수 있는 다양한 문제점들을 직접 확인한 후 대책을 마련하였다.

5.5 품질확인

현장타설말뚝 시공 완료후에는 콘크리트 말뚝본체의 건전도를 확인하기 위해 공대공시험(cross-hole sonic logging test)을 실시하였으며, 선단주입(toe grouting)파이프를 이용하여 코어링(coring)을 실시함으로써 콘크리트 본체의 강도 확인, 콘크리트와 암반 접촉부의 슬라임 상태, 지지암반의 강도확인 등의 방법으로 현장타설말뚝의 시공품질을 확인하였다.

6. 결언

건축공사에서 대구경 현장타설말뚝의 사용빈도가 늘어가고 있지만 품질관리를 위한 관심과 노력은 아직 많이 부족한 것이 현실이다. 본고에서는 현장타설말뚝의 품질관리 절차를 제시하였으며, 그 절차에 따라 Fast Track방식의 현장타설말뚝 공사를 추진한 현장사례를 고찰하였다.

현장타설말뚝 시공은 현장 지반조건을 고려한 설계검토의 선행과 시공중 품질관리기준 확립을 위한 시험시공, 설계적정성 검증을 위한 재하시험의 절차과정이 필수적이며, Fast Track공사로 계획된 경우에는 설계단계에서부터 품질관리계획을 고려하여야 한다. Fast Track공사는 본설계가 확정되기 전에 수행하는 공사인 만큼 실시설계시 구조계획이 변경될 가능성도 배제하기 어렵다. 따라서, Fast Track 공사로 선시공된 현장타설말뚝에 지지력 부족 문제가 발생하지 않도록 설계 전과정에서 건축구조분야 기술자와 지반분야 기술자의 원활한 커뮤니케이션을 유지하는 것도 매우 중요하다.

참고문헌

1. 누리꿈 스퀘어 신축공사 삼성건설 JV (2005), "첨단 IT 콤플렉스 신축공사 현장타설말뚝 재하시험 보고서"
2. 누리꿈 스퀘어 신축공사 삼성건설 JV (2005), "첨단 IT 콤플렉스 신축공사 지반조사 보고서"
3. 삼성건설 기술연구소 (2005), "첨단 IT 콤플렉스 신축공사 수중 불분리성 콘크리트 기술자료"
4. Osterberg, J. O. (1998), "The Osterberg Load Test method for Drilled Shafts and Driven Piles-the First Ten Years.", Proceedings 7th Int'l Conference on Deep Foundations, Viena, Austria. June 15~17, Deep Foundation Institute, Englewood Cliffs, N.J., 1.28.1~1.28.11.